

УДК 621.789:620.18

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ
ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКИ НА СТРУКТУРУ ШВА В ТИТАНОВЫХ ИЗДЕЛИЯХ,
ПОЛУЧЕННЫХ ТРАДИЦИОННЫМИ И АДДИТИВНЫМИ МЕТОДАМИ**

А. Яхин

Научный руководитель: профессор, д.ф.-м.н. А. В. Панин

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: albertodebertto@mail.ru

**THE INFLUENCE OF THE ELECTRONIC BEAM WELDING PARAMETERS ON THE WELD
STRUCTURE IN TITANIUM PARTS OBTAINED BY TRADITIONAL AND ADDITIVE METHODS**

A. Iakhin

Scientific Supervisor: Prof., Dr. A. V. Panin

Tomsk Polytechnic University, Russia, Tomsk, Lenin str., 30, 634050

E-mail: albertodebertto@mail.ru

Abstract. *The influence of current beam on the microstructure and microhardness has been investigated in electron-beam welded Ti-6Al-4V alloy parts obtained by traditional manufacturing and additive manufacturing. Electron-beam welding produced few discriminative zones (FZ – the fusion zone, HAZ I and HAZ II – the heat affected zone, BM - the base metal) in the welded material obtained by both rolled and SLM processes. The results of the research show that SLM samples demonstrate higher penetration ability than rolled samples. The microhardness in the HAZ decreased towards the HAZ with distance from the weld center at all varied values of the beam current, except for the SLM sample at 25 mA.*

Введение. В последнее время большой интерес представляют исследования аддитивных методов создания металлических изделий, в том числе из титановых сплавов [1]. Однако получение крупных титановых изделий пока не представляется возможным в виду ограничений в размерах рабочей камеры, структурной анизотропии и дефектов. Решением данной проблемы является соединение 3D-напечатанных изделий различными методами, в том числе сваркой. Для получения качественных сварных соединений, особенно в авиа- и ракетостроении, широко используется электронно-лучевой метод, в связи с высокой технологичностью при регулировании параметров сварки, позволяющих добиваться необходимых физико-механических свойств в соответствии с условиями эксплуатации. Использование данного метода для сварки традиционно полученных титановых сплавов достаточно хорошо исследовано [2], в отличие от сварки аддитивно полученных изделий. Таким образом, целью данной работы является исследование влияния параметров электронно-лучевой сварки на формирование структуры сварного шва в титановых изделиях, полученных традиционными и аддитивными методами.

Экспериментальная часть. В данной работе проводились исследования на образцах титанового сплава Ti-6Al-4V, полученных прокаткой и SLM (Selective laser melting – селективное лазерное плавление). Исходные образцы проката были в состоянии поставки согласно ГОСТ 22178-76. Образец

SLM был получен на установке EOSINT M280 (EOS Electro Optical Systems, Мюнхен, Германия) [3]. В ходе процесса SLM использовался порошок титанового сплава Ti-6Al-4V, с размером частиц от 50 до 100 мкм канадской компании AP & C. Электронно-лучевая сварка (ЭЛС) осуществлялась на установке ЭЛУ-9. Варьируемым параметром в данной работе являлась сила тока электронного пучка в диапазоне от 20 до 35 мА с шагом 5 мА. Фиксированные параметры ЭЛС приведены в таблице 1. Образцы подвергались одностороннему поверхностному проплавлению. Измерения микротвердости проводились на микротвердомере ПМТ-3.

Таблица 1

Параметры электронно-лучевой сварки исходных образцов

Образцы	Толщина пластин, мм	Ускоряющее напряжение, кВ	Скорость сварки, мм/мин
Прокат	2	30	900
SLM	2	30	900

Результаты. При электронно-лучевой сварке титанового сплава Ti-6Al-4V вне зависимости от способа получения формируется несколько сварных зон (рис.1): FZ – зона сплавления, которая подвергается плавлению и повторному затвердеванию, HAZ-I – зона ближнего термического влияния, образование которой происходит вблизи сварного шва и HAZ-II – зона дальнего термического влияния, которая подвергается тепловому циклу в твердом состоянии и BM – основной металл, который в значительной степени не зависит от процесса сварки. Каждая зона формируется в соответствии со своей термической историей и характеризуется определенным фазовым составом. Наглядно показано (рис.1) различное влияние силы тока при электронно-лучевой сварке на глубину проплавления и микроструктуру в зависимости от способа получения исходных образцов. Образцы SLM демонстрируют в этом случае более высокую проплавляющую способность, чем прокатанные образцы.

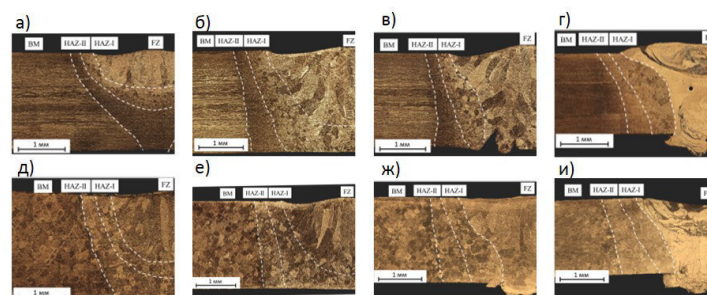


Рис. 1. Металлографические изображения поперечных шлифов проката и SLM образцов при различной силе тока: прокат: а,б,в,г – 20,25,30,35 мА соответственно, SLM образец: д,е,ж,и – 20,25,30,35 мА соответственно

Проведенные измерения геометрических характеристик сварного шва также показывают, что проплавляющая способность аддитивно полученных образцов SLM выше, чем у образцов, полученных традиционным методом прокаткой. Данный факт связан с меньшей теплопроводностью, меньшей энергией Гиббса более крупных зерен исходных SLM образцов. Графически представлена зависимость глубины проплавления от силы тока (рис. 2а). Отмечено, что при силе тока от 30 до 35 мА и текущих

параметрах сварки (Таблица 1) наблюдается сквозное проплавление с формированием натека металла с обратной стороны шва для всех образцов, причем с большей интенсивностью для образцов SLM.

Согласно графику (рис.2б) с повышением силы тока увеличивается ширина вершины шва, а это указывает на повышение внутренних растягивающих напряжений, твердости (рис. 2в), что негативно сказывается на прочности сварного шва, и подтверждается хрупкими трещинами при сварке с силой тока 35 мА для всех образцов (рис.1). Наблюдается повышенное влияние силы тока на ширину вершины сварного соединения для прокатанных образцов, в отличие от образцов SLM. Формирование сварного шва при силе тока от 20 до 25 мА не приводит к существенным отличиям в ширине вершины для всех исследуемых образцов.

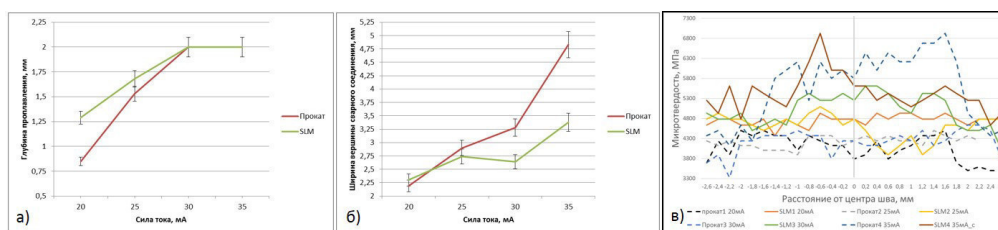


Рис. 2. Графики зависимостей глубины проплавления – а, ширины вершины сварного соединения – б от силы тока, распределения микротвердости исследуемых образцов – в

Закключение. В результате проведенных исследований образцы SLM демонстрируют более высокую проплавляющую способность, чем прокатанные образцы. Сила тока вблизи 30 мА и выше приводит к проплавлению и формированию натека металла с обратной стороны сварного шва для всех исследуемых образцов. Также отмечено, что с повышением силы тока, прокатанные образцы подвержены большему увеличению ширины вершины сварного соединения, чем SLM, и способствует повышению внутренних напряжений, что негативно может сказаться на прочности соединения. Определены 4 сварочные зоны, образующиеся в результате электронно-лучевой сварки во всех исследуемых образцах. При силе тока 20, 25, 30 мА микротвердость в сварном шве проката незначительно повышается, при 35 мА происходит резкое увеличение в среднем до 6 ГПа. Для SLM образцов при силе тока 20 мА изменение микротвердости в шве не наблюдается, при 25 мА происходит некоторое снижение до 4 ГПа, а при 30 и 35 мА заметно повышение микротвердости в среднем до 5,3 и 5,5 ГПа, соответственно.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Rafi H.K., Karthik N.V., Gong H., Starr T.L., Stucker B. E. Microstructures and Mechanical Properties of Ti6Al4V Parts Fabricated by Selective Laser Melting and Electron Beam Melting // Journal of Materials Engineering and Performance. – 2013. – V. 22., № 12. – P. 3872–3883.
2. Рыкалин Н.Н., Углов А.А., Зуев И.В., Кокора А.Н. Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов. – М.: Машиностроение, 1985. – 496 с.
3. Sinyakova E.A., Panin S.V., Teresov A.D. Surface modification of selective laser melted Ti-6Al-4V by ultrasonic impact treatment and electron beam irradiation // AIP Conf. Proc. – 2019. – № 2167. – P. 020336.